

УЧРЕДИТЕЛИ

ФГБУ науки
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН,
НП “Национальная технологическая
палата”,
ООО “Сенсидат-Плюс” (издатель)

Гл. редактор **Ф. Ф. Пашенко**
Зам. гл. редактора **А. Ф. Каперко**
Гл. редактор ИКА **В. Ю. Кнеллер**
Отв. секретарь **Г. М. Баранова**
Выпускающий редактор **С. В. Суханова**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р. Р. Бабаан, д. т. н., проф.,
Г. М. Баранова,
С. Н. Васильев, акад. РАН,
Г. И. Джанджгава, д. т. н., проф.,
Е. Л. Ерёмин, д. т. н., проф.,
А. Н. Житков, к. т. н., доц.,
Э. Л. Ишквич, д. т. н., проф.,
А. А. Ищенко, к. э. н.,
С. И. Касаткин, д. т. н., проф.,
А. М. Касимов, д. т. н.,
А. Ф. Каперко, д. т. н., проф.,
В. Ю. Кнеллер, д. т. н., проф.,
Б. В. Лункин, к. т. н.,
В. П. Мешалкин, акад. РАН,
В. П. Морозов, д. т. н.,
Д. А. Новиков, чл.-корр. РАН,
П. П. Пархоменко, чл.-корр. РАН,
Ф. Ф. Пашенко, д. т. н., проф.,
А. Ф. Пашенко, к. т. н.,
Г. А. Пикина, д. т. н., проф.,
Б. И. Подлепешкий, к. т. н., доц.,
В. В. Поляков,
Н. Л. Прохоров, д. т. н., проф.,
О. С. Сироткин, чл.-корр. РАН,
Чун Кукджин, проф.,
В. А. Шахнов, чл.-корр. РАН,
М. С. Шкабардия, д. т. н., проф.,
И. Б. Ядыкин, д. т. н., проф.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ РЕДСОВЕТЫ

(руководители)

Санкт-Петербург
В. Г. Кнорринг, д. т. н., проф. — (812) 297-60-01
Нижний Новгород
С. М. Никулин, д. т. н., проф. — (831) 436-78-40
Екатеринбург
С. В. Поршнев, д. т. н., проф. — (343) 375-97-79
Новосибирск
Ю. В. Чугуй, д. т. н., проф. — (383-3) 33-73-60
Красноярск
В. Г. Паюков, д. т. н., проф. — (391-2) 912-279
Бийск
Ю. А. Галенко, д. т. н., проф. — (3854) 43-25-69
В. А. Абанин, д. т. н., проф. (3854) 43-25-71
Пенза
М. А. Шербаков, д. т. н., проф. — (841-2) 56-37-08
Рязань
С. Н. Кириллов, д. т. н., проф. — (491-2) 92-04-55
Ульяновск
Н. Г. Ярушкина, д. т. н., проф. — (842-2) 43-03-22
Ижевск
В. А. Алексеев, д. т. н., проф. — (341-2) 21-29-33
Оренбург
М. Г. Кучеренко, д. т. н., проф. — (353-2) 77-34-19
Владимир
В. Н. Устюжанинов, д. т. н., проф. —
(492-2) 33-59-67
Тула
В. Я. Распопов, д. т. н., проф. — (487-2) 35-19-59
Воронеж
В. К. Битюков, д. т. н., проф. — (473-2) 55-36-94
Курск
В. С. Титов, д. т. н., проф. — (471-2) 58-71-12
Тамбов
С. В. Мищенко, д. т. н., проф. — (475-2) 72-10-19
Липецк
Ю. И. Кудинов, д. т. н., проф. — (4742) 32-80-53
Астрахань
И. Ю. Петрова, д. т. н., проф. — (851-2) 25-73-11
Минск
И. С. Манах, к. ф.-м. н. — (417) 278-13-13
Уфа
А. И. Гулин, д. т. н., проф. — (347-2) 43-14-70

СОДЕРЖАНИЕ

**ТЕОРИЯ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ
И СИСТЕМ**

- Агамалов Ю. Р.** О возможностях приложения теоретико-инвариантного подхода к задаче измерения сигналов постоянного тока на фоне экспоненциальных помех 3
Рабин А. В. Ортогональное кодирование как способ повышения помехоустойчивости при передаче сигналов по многолучевым каналам с замираниями 7
Якимов А. Н., Бестугин А. Р., Киришина И. А. Контроль пространственной локализации информации в наземной радиолинии связи 13

* * *

Поздравляем юбиляра!

- Валерию Михайловичу Сапельникову — 80 лет** 18

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ
И СИСТЕМ**

- Недосекин П. Г.** Трехслойный детектор гамма излучения на основе алмаза . . . 20
Морозов В. П., Осипов А. Б., Целикин Ю. В. Контроль бортового оборудования для привязной телекоммуникационной платформы 27
Шишлаков В. Ф., Соленая О. Я., Рысин А. В., Соленый С. В. Моделирование режимов работы электроэнергетической системы с целью повышения ее устойчивости функционирования 30
Белопухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М. и др. Измерение радиальных зазоров в газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на одновитковый вихретоковый датчик 39

ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ (журнал в журнале)

Поздравляем юбиляра!

- Владимиру Юрьевичу Кнеллеру — 90 лет!** 47

* * *

- Грановский В. А.** Метрология будущего: два сценария для методологии и индустрии 49
Библиография+ 58

**К 80-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ИМ. В. А. ТРАПЕЗНИКОВА РАН**

- Восемьдесят лет развития отечественной науки об управлении** 62
Новые книги к 80-летию ИПУ РАН. 73

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых изданий ВАК и в RSCI на базе Web of Science

Подписные индексы: 79363 в каталоге Роспечати; 40874 в каталоге “Пресса России”
АДРЕС РЕДАКЦИИ: 117997, ГСП-7, Москва, ул. Профсоюзная, 65, к. 383. Тел./факс: (495) 330-42-66
www.datsys.ru. E-mail: datsys@mail.ru

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены ИП Прохоров О. В.
Отпечатано в типографии ООО “Авансес Солюшнз”. Заказ ds419. Подписано в печать 29.04.2019.
Журнал перерегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций 26.12.2013.
ПИ № ФС 77-56548. ISSN 1992-7185

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). На сайте Научной электронной библиотеки (www.elibrary.ru) доступны полные тексты статей.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 539.1.074.5

ТРЕХСЛОЙНЫЙ ДЕТЕКТОР ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА DIAMOND-BASED THREE-LAYER GAMMA-RAY DETECTOR

Недосекин Павел Геннадьевич

аспирант

E-mail: sklir@mail.ru

Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета
“Высшая школа экономики”, Москва

Аннотация: Рассмотрена эффективность трехслойного алмазного детектора гамма-радиации на основе монокристаллического алмаза. Приведены результаты измерения абсолютной эффективной скорости счета зарядового сигнала однослойного, двухслойного и трехслойного алмазного детектора. Показано, что применение трехслойной структуры алмазного детектора позволяет увеличить амплитуду выходного зарядового сигнала детектора, расширить динамический диапазон работы детектора, увеличить точность и информативность систем контроля радиационной обстановки.

Ключевые слова: алмазный детектор, гамма излучение, радиационная обстановка, линейная передача энергии, счетчик.

Nedosekin Pavel G.

Postgraduate

E-mail: sklir@mail.ru

Moscow Institute of Electronics and Mathematics
of National Research University Higher School
of Economics, Moscow

Abstract: The counting efficiency of a three-layer diamond detector of gamma radiation based on single-crystal diamond is considered. The paper specifies the results of measurements of the absolute effective charge counting rate of a single-layer, two-layer, and three-layer diamond detector are presented. The use of a three-layer structure of a diamond detector, makes it possible to enhance the amplitude of charge output spectrum, to expand the detector dynamic range, as well as to improve the accuracy and information content of radiation monitoring systems.

Keywords: diamond detector; gamma radiation; radiation environment; linear energy transfer; counter.

ВВЕДЕНИЕ

Детекторы автоматического мониторинга радиационной обстановки стали неотъемлемой частью систем контроля работоспособности и управления объектов с длительным ресурсом эксплуатации до 20–25 лет без возможности замены комплектующих регистрирующей радиационной аппаратуры. Одним из возможных направлений работы таких детекторов является регистрация фона и дозы гамма-излучения, создаваемого космическим излучением и излучением природных радионуклидов. Детекторы радиационной обстановки обеспечивают непрерывный мониторинг окружающего пространства [1], и при резком возрастании потока космического излучения они выдают управляющий сигнал на включение радиационно-устойчивых режимов работы электронной аппаратуры [2].

В связи с тенденцией на увеличение ресурсов эксплуатации аппаратов, работающих в агрессивных средах, до 20–25 лет возникает необходимость применения радиационностойких детекторов контроля параметров гамма-фона [3]. В табл. 1, представлены некоторые полупроводниковые материалы, используемые для создания детекторов, регистрирующих гамма-излучение.

В результате радиационного облучения нарушается поверхность детектора, в полупроводниковой структуре кристалла появляются дефекты и включения, изменяется сопротивление материала, что, в свою очередь, вызывает искажения электрических полей, увеличиваются токи утечки и появляется вероятность захвата носителей заряда в ловушки и рекомбинации. Нарушения в общем случае создаются неравномерно по чувствительному объему, поэтому ухудшается разрешение и появляются дополнительные пики в ампли-

тудном распределении импульсов, что является одним из признаков существенных повреждений. Кроме того, растет время сбора заряда. Многообразие этих факторов приводит к ухудшению свойств используемых в настоящее время детекторов.

Поэтому разработка детекторов прогнозирования и наблюдения радиационной обстановки на основе алмазных полупроводниковых структур, обладающих большей радиационной стойкостью к ионизирующим излучениям, чем другие полупроводниковые структуры, становится весьма актуальной задачей [4].

Алмазные детекторы (АД) гамма излучения обладают: высокой радиационной стойкостью; шириной запрещенной зоны, превышающей на порядок другие полупроводниковые детекторы, что позволяет избежать лавинного перехода носителей заряда между уровнями при облучении кристалла; они могут работать при высоких температурах окружающей среды до 500 °С [5]. В то же время, использование алмазных пластин в качестве активного элемента детектора гамма-излучения имеет ряд специфических особенностей.

Одна из особенностей — обеспечение полного сбора заряда в детекторе на основе монокристаллического алмаза, т. е. заряда, который образуется в алмазной пластине за счет гамма-излучения. Гамма-излучение — это энергия гамма-квантов, которые поглощаются объемом рабочего вещества. Следовательно, чем больше толщина и плотность вещества, через которую пройдут гамма-кванты, тем больше энергии они передадут алмазному детектору, и тем лучше окажется его абсолютная эффективная регистрация гамма-излучения.

Поэтому алмазные пластины необходимо подбирать по толщине, но чем больше толщина алмазной пластины, тем большее напряжение питания нужно подавать на детектор. Необходимо до-

стичь равновесия при подборе толщины алмазной пластины от напряжения питания без ущерба для получения выхода максимальной абсолютной счетной эффективности алмазного детектора. Получение кристалла алмаза большого объема пока технически невозможно, а применением других полупроводниковых материалов для регистрации гамма-излучения хотя и можно добиться похожих технологических параметров, но при этом напряжение питания такого детектора будет возрастать от толщины, и эффективность применения такого детектора будет весьма ограничена.

Нужен поиск альтернативных решений, одно из них описано в данной статье, в которой предлагается использовать многослойность структуры алмазного детектора для повышения его абсолютной счетной эффективности регистрации гамма-излучения.

В настоящее время в мире широко проводятся исследования и разработано множество конструкций радиационных детекторов и датчиков.

По физической сущности взаимодействия ионизирующих излучений с веществом выделяют следующие типы детекторов:

- ионизационный, основанный на способности излучений ионизировать среду, через которую они проходят [6—8];
- сцинтилляционный, регистрирующий фотоны света, возникающие в сцинтилляторе под действием ионизирующих излучений [9];
- люминесцентный, базирующийся на эффектах радиофотолюминесценции (ФЛД) и радиотермолюминесценции (ТЛД); детекторы поглощают и накапливают энергию излучения в молекулярных центрах фотолюминесценции, они способны высвечивать накопленную энергию при освещении ультрафиолетовым светом (ФЛД) или при нагревании (ТЛД) [10];
- фотографический, основанный на свойстве ионизирующих излучений воздействовать на чувствительный слой фотоматериалов аналогично видимому свету;
- химический, основанный на измерении выхода радиационно-химических реакций (изменение степени окраски или цвета), протекающих под действием ионизирующих излучений; этот метод используют при регистрации значительных уровней радиации;
- калориметрический, базирующийся на измерении количества теплоты, выделяемой в де-

Таблица 1
Полупроводниковые материалы, используемые для создания детекторов контроля гамма-излучения

Материал	Предельная радиационная стойкость, P/c	Ширина запрещенной зоны E_g , эВ
Si	$10^3 \dots 10^5$	1,12
Ge	$10^4 \dots 10^6$	0,67
CdTe	10^8	1,47
HgI ₂	10^7	2,13
CdS	$10^8 \dots 10^9$	2,41
Алмаз	$10^9 \dots 10^{10}$	5,4...6,4

текторе при поглощении энергии ионизирующих излучений [11].

В данной статье изложена работа по исследованию структуры трехслойного детектора, целью которой являлась разработка такой конструкции детектора, когда без изменения питающего входного напряжения можно повысить счетную абсолютную эффективность и скорость счета при регистрации гамма-излучения.

СТРУКТУРА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Структура трехслойного детектора показана на рис. 1, она представляет собой последовательно соединенные между собой активные чувствительные элементы из монокристаллического алмаза.

Алмазный детектор состоит из трех активных чувствительных элементов АЧЭ1, АЧЭ2 и АЧЭ3. Активный чувствительный элемент (АЧЭ) изготавливается из монокристаллического алмаза. На плоскость каждой пластины нанесены проводящие металлические контакты. Проводящие металлические контакты к алмазу обычно выполняются на основе металлов Ti, Mo или Ta напылением из газовой фазы в вакууме, которые образуют в процессе отжига карбиды, увеличивая адгезию к последующему напылению пленки, что повышает прочность механического контакта. На полученной структуре карбида титана TiC магнетронным напылением осаждается проводящая пленка из Al. Контактный проводящий слой на алмазе — пленка Ti/Al, полученная методом магнетронного распыления в среде Ag при давлении 10 мТорр, имеет

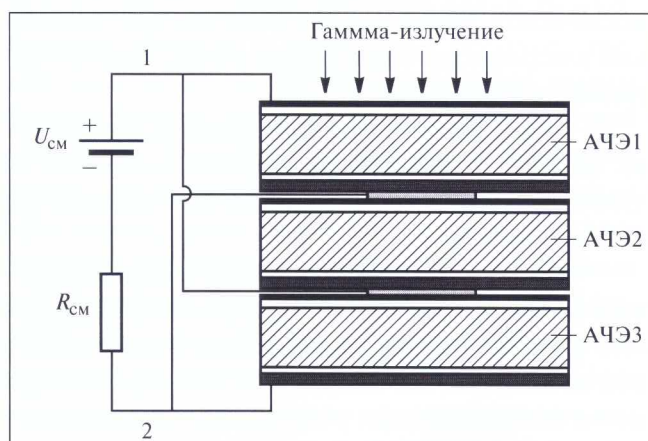


Рис. 1. Структура трехслойного алмазного детектора для регистрации гамма-излучения

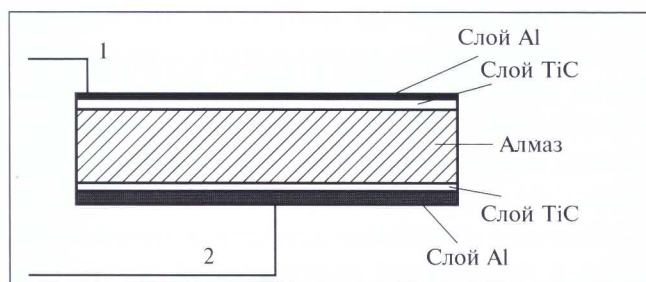


Рис. 2. Структура активного чувствительного алмазного элемента (АЧЭ)

толщину 50...100 нм. С контактного слоя пленки Ti/Al пластины выводится электрический контакт золотым проводником, диаметр проводника 40 мкм. Элемент АЧЭ изображен на рис. 2.

Крепление электрических контактов осуществляется при помощи ультразвуковой сварки. Для увеличения рабочего объема АЧЭ скреплялись между собой плоскостями при помощи серебро-содержащей пасты, с помощью которой происходит механический и электрический контакт. Торцы кристалла закрываются диэлектрическим материалом — эпоксидным лаком. Эпоксидный лак выполняет функцию механической и электрической защиты активных чувствительных элементов и компонентов от влаги, грязи и механических воздействий.

Активная часть детектирования алмазного детектора состоит из алмазных чувствительных элементов (АЧЭ), которые располагаются один слой над другим, формируя многослойную структуру, через которую проходят гамма-кванты от радиоактивного излучателя.

При проведении эксперимента для получения зарегистрированных данных при облучении гамма-квантами алмазного детектора и последующей обработки этих данных использовался спектрометрический комплекс “Грин Стар” [12]. Алмазный детектор и источник гамма-излучения располагаются в металлическом шкафу для избежания внешних помех и защиты персонала от излучения. Поток гамма-излучения подавался на алмазный детектор перпендикулярно плоскости поверхности алмазного детектора. Сигнал от детектора обрабатывался спектрометрическим комплексом и выводился на монитор компьютера в виде импульсного спектра по энергии от заряда, полученного в результате поглощения гамма-квантов объемом алмазного детектора.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ

При проведении эксперимента на алмазный детектор падает параллельный (коллимированный) пучок гамма-квантов с источника с изотропным излучением ^{137}Cs . Сам источник рассматривать не будем, необходимо лишь подтвердить тот факт, что без изменения напряжения питания на детекторе с ростом толщины, т. е. числа слоев детектора, абсолютная эффективность сбора заряда алмазного детектора будет увеличиваться.

Испускаемые источником излучения гамма-кванты не все попадают в детектор и не все гамма-кванты будут в нем зарегистрированы. В спектрометрии детектора важно, чтобы гамма-кванты передали свою энергию чувствительной области детектора и были зарегистрированы в пике полного поглощения. Это может произойти как в результате одного фотоэффекта, так и серии последовательных взаимодействий (комптоновского рассеяния и образования пар) с фотоэффектом в конце цепочки таких взаимодействий [13, 14].

В нашем случае необходимо определить абсолютную эффективность детектора, т. е. отношение количества гамма-квантов, зарегистрированных детектором N_{det} , к количеству гамма-квантов, испущенных источником N_{ist} :

$$\varepsilon_{\text{abs}} = N_{\text{det}}/N_{\text{ist}} \quad (1)$$

Подсчитаем количество гамма-квантов N_{ist} , испущенных источником излучения ^{137}Cs . Энергия гамма-квантов $E_{\gamma} = 662$ кэВ, с момента поверки источника прошло 16 лет. На момент поверки активность источника по паспорту равнялась $A_0 = 113,5$ кБк. Тогда активность источника излучения определится в виде:

$$A = A_0 \cdot 2^{-(t/T_{1/2})},$$

где A — текущая активность изотопа, A_0 — начальная активность изотопа, t — время с момента аттестации активности, $T_{1/2}$ — период полураспада изотопа (30 лет для ^{137}Cs). В результате получим: $A = 113,5 \cdot 2^{-(16/30)} = 78,6$ кБк (1 Бк = 1 расп/с).

Измерения проводятся в течение часа, и за время t (3600 с) источник испускает гамма-кванты в количестве:

$$N_{\text{ist}} = A \cdot t = 78\,600 \cdot 3600 = 2,8 \cdot 10^8.$$

Количество гамма-квантов, зарегистрированных детектором N_{det} , рассчитаем из закона ослабления гамма-квантов от энергии ^{137}Cs , равной $E_{\gamma} = 662$ кэВ для алмаза:

$$N_{\text{ist0}} = N_{\text{ist}} \cdot e^{-(\mu\rho L)}, \quad (2)$$

где N_{ist} — количество гамма-квантов, испущенных источником; N_{ist0} — количеству гамма-квантов, прошедших через объем детектора; μ — массовый коэффициент ослабления в веществе (табличное значение для алмаза $0,07$ см²/г); $\rho = 3,52$ г/см³ — плотность алмаза; L — толщина детектора в сантиметрах.

В эксперименте были использованы алмазные пластины толщиной $0,03$ см с последующей сборкой пластин в два и три слоя. Рассчитаем для каждого детектора количество N_{ist0} по формуле (2). Получим для детектора:

— с одной пластиной:

$$N_{\text{ist0}}(1) = 2,8 \cdot 10^8 \cdot e^{-(0,07 \cdot 3,52 \cdot 0,03)} = 2,78 \cdot 10^8.$$

— с двумя пластинами:

$$N_{\text{ist0}}(2) = 2,8 \cdot 10^8 \cdot e^{-(0,07 \cdot 3,52 \cdot 0,06)} = 2,758 \cdot 10^8.$$

— с тремя пластинами:

$$N_{\text{ist0}}(3) = 2,8 \cdot 10^8 \cdot e^{-(0,07 \cdot 3,52 \cdot 0,06)} = 2,738 \cdot 10^8.$$

Тогда зарегистрированных детектором гамма-квантов N_{det} будет: $N_{\text{det}} = N_{\text{ist}} - N_{\text{ist0}}$. В результате для детектора:

— с одной пластиной: $N_{\text{det}}(1) = 2 \cdot 10^6$, из формулы (1): $\varepsilon_{\text{abs}} = 0,7$ %;

— с двумя пластинами: $N_{\text{det}}(2) = 4,2 \cdot 10^6$, $\varepsilon_{\text{abs}} = 1,5$ %;

— с тремя пластинами: $N_{\text{det}}(3) = 6,2 \cdot 10^6$, $\varepsilon_{\text{abs}} = 2,2$ %.

Из приведенных расчетов видно, что с увеличением толщины детектора увеличивается и абсолютная эффективность детектора при регистрации гамма-квантов.

Далее проведем экспериментальное исследование зависимости абсолютной эффективности детектора от числа его слоев.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Для экспериментального исследования алмазного детектора, на который воздействует гамма-

излучение, и получения результата изменения абсолютной эффективности в зависимости от числа слоев в детекторе, были изготовлены экспериментальные образцы из монокристаллического алмаза 2А типа. Напряжение питания каждого детектора составляло 100 В, продолжительность измерения $T = 3600$ с, источник гамма излучения ^{137}Cs . Результаты измерения приведены в табл. 2.

Результаты измерения, полученные алмазными детекторами под воздействием гамма-излучения показали, что количество гамма-квантов, отдающих свою энергию в объеме алмазного детектора, увеличивается с ростом числа слоев в алмазном детекторе, так как повышается эффективная толщина самого детектора. Но при этом напряжение смещения электрической схемы, в которую включен алмазный детектор, не меняется

и не превышает 100 В. Изменение объема детектора только за счет увеличения толщины кристалла алмаза приведет к пропорциональному увеличению напряжения алмазного или любого другого полупроводникового детектора. Соответственно, увеличивая эффективный объем детектора из-за многослойности детектора, растет и количество гамма-квантов, отдающих свой заряд в детектор.

Теперь определим абсолютную эффективность алмазного детектора по пику полного поглощения. Она определяется отношением количества гамма-квантов, зарегистрированных детектором в пике полного поглощения $N_{d \text{ pik}}$, к количеству гамма-квантов, испущенных источником N_{ist} [15]:

$$\epsilon_{\text{abs}} = N_{d \text{ pik}}/N_{\text{ist}}$$

Результат изменения ϵ_{abs} приведен в табл. 3.

Таблица 2

Результаты проведения эксперимента

№ детектора АД	Алмазный чувствительный элемент АЧЭ, мм	Количество гамма-квантов, зарегистрированных детектором за 3600 с	Примечание
1	АЧЭ1(4,17 × 3,5 × 0,32)	$2,09 \cdot 10^6$	Детектор с одним слоем
2	АЧЭ2(4,16 × 3,5 × 0,34)	$2,66 \cdot 10^6$	
3	АЧЭ3(3,89 × 3,85 × 0,29)	$9,6 \cdot 10^6$	
4	АЧЭ4(3,87 × 3,85 × 0,3)	$1,6 \cdot 10^7$	
5	АЧЭ5(4,72 × 3,64 × 0,27)	$6,3 \cdot 10^6$	
6	АЧЭ6(3,75 × 3,35 × 0,31)	$5,9 \cdot 10^6$	
7	АЧЭ1(4,17 × 3,5 × 0,32) АЧЭ2(4,16 × 3,5 × 0,34)	$4,5 \cdot 10^6$	Детектор двухслойный, состоит из двух АЧЭ элементов
8	АЧЭ3(3,89 × 3,85 × 0,29) АЧЭ4(3,87 × 3,85 × 0,3)	$2,7 \cdot 10^7$	
9	АЧЭ5(4,72 × 3,64 × 0,27) АЧЭ6(3,75 × 3,35 × 0,31)	$8,6 \cdot 10^6$	
10	АЧЭ3(3,89 × 3,85 × 0,29) АЧЭ4(3,87 × 3,85 × 0,3) АЧЭ5(4,72 × 3,64 × 0,27)	$3,8 \cdot 10^7$	Детектор трехслойный, состоит из трех АЧЭ элементов
11	АЧЭ1(4,17 × 3,5 × 0,32) АЧЭ2(4,16 × 3,5 × 0,34) АЧЭ6(3,75 × 3,35 × 0,31)	$1,03 \cdot 10^7$	

Таблица 3

Результат определения абсолютной эффективности детектора по пику полного поглощения

№ детектора АД	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\epsilon_{\text{abs}}, \%$	0,7	0,9	3,4	5,8	2,2	2	1,6	9,92	3,06	13,7	3,7

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

В результате проведенных исследований и последовательных измерений образцов алмазных детекторов отмечается изменение счетной эффективности алмазного детектора от изменения числа его слоев. Полученные данные систематизированы и записаны в табл. 4, в которой отражены расчетные и экспериментальные данные.

Анализируя полученные данные из табл. 4, можно заметить некоторое расхождение расчетной и экспериментальной частей. Заметим, что для расчетной части эксперимента применяется простейший предварительный метод определения абсолютной эффективности детектора, при котором облучался детектор параллельным (коллимированным) пучком от источника. Также не проводится полный анализ прохождения гамма-квантов через слои детектора. Многослойный детектор состоит из пластин алмаза, это кубическая аллотропная форма углерода, где коэффициент ослабления μ в объеме вещества будет отличаться от табличного значения для углерода. Отметим, что слои между собой в детекторе объединены с помощью серебряносодержащей пасты, где также происходит ослабление гамма-квантов с последующим их поглощением в объеме алмазного детектора.

Одно из основных показателей погрешности, вносимой между измерениями, состоит в уникальности самого кристалла алмаза. Так как в эксперименте применялся природный кристалл монокристаллического алмаза, то его свойства не повторяются от кристалла к кристаллу. Разное количество примесей и дефекты кристаллической решетки в каждом монокристалле алмаза не соответствуют друг другу, что также влияет на носители заряда в полупроводнике, зону проводимости и образование эффективного заряда в объеме алмазного детектора.

Важно, что как в экспериментальной, так и в расчетной частях эксперимента с увеличением числа слоев в алмажном детекторе и, соответственно, увеличением его полезного объема при постоянном напряжении питания на самом детекторе происходит увеличение абсолютной эффективности сбора заряда гамма-квантов от источника излучения ^{137}Cs .

Важно, что как в экспериментальной, так и в расчетной частях эксперимента с увеличением числа слоев в алмажном детекторе и, соответственно, увеличением его полезного объема при постоянном напряжении питания на самом детекторе происходит увеличение абсолютной эффективности сбора заряда гамма-квантов от источника излучения ^{137}Cs .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, трехслойная структура алмазного детектора позволяет повысить абсолютную эффективность регистрации гамма-квантов за счет увеличения полезного рабочего объема детектора при сохранении рабочего напряжения питания на детекторе.

Выходной зарядовый сигнал трехслойного детектора в исследуемых моделях при съеме сигнала с трех алмазных слоев больше, чем при съеме сигнала с одного или двух слоев. Следовательно, применение трехслойной структуры позволяет расширить динамический диапазон измерения гамма-излучения.

Отметим, что результаты исследования характеристик трехслойной структуры АД могут быть распространены и на структуры АД с большим числом слоев. Детекторы с числом слоев 3 и более могут использоваться для регистрации высокоэнергетических ионизирующих излучений, гамма-квантов больших энергий.

Проведенные исследования показали реальную возможность применения многослойных алмазных детекторных структур для применения их в качестве детектора гамма-излучения, позволяющего эффективно регистрировать заряженные частицы.

Таблица 4

Расчетные и экспериментальные данные исследования

№ детектора АД	Эффективность алмазного детектора в эксперименте ϵ_{abs} , %	Эффективность алмазного детектора при расчете ϵ_{abs} , %	Примечание
1	0,7	0,7	Однослойная структура детектора
2	0,9		
3	3,4		
4	5,8		
5	2,2		
6	2		
7	1,6	1,5	Двухслойная структура детектора
8	9,92		
9	3,06		
10	13,7	2,2	Трехслойная структура детектора
11	3,7		

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang S., Li D., Xiao Y., et al. Diamond radiation detector used for space radiation detection: a state-of-art review // Cailliao Daobao. Materials Review. — 2018. — Vol. 32. — Issue 5. — P. 1459—1468.
2. Захарченко К. В., Каперко А. Ф., Колюбин В. А. и др. Моделирование работы узла сенсоров модуля контроля параметров потоков космического излучения // Измерительная техника. — 2016. — № 8. — С. 63—68. [Zakharchenko K. V., Kaperko A. F., Kolyubin V. A., et al. Modeling of the sensor node operation of the space radiation flux parameters control module // Measuring technique. — 2016. — N 8. — P. 63—68. (In Russian)]
3. Zakharchenko K. V., Kolyubin V., Kaperko A., et al. Modeling the operation of a sensor unit in a monitoring device for the parameters of cosmic ray fluxes // Measurement Techniques. — 2016. — Vol. 59, N 8. — P. 884—891.
4. Gladchenkov E., Zakharchenko K. V., Kaperko A., et al. A Diamond Detector for Registration of Ionizing Radiation with Low Linear Energy Transfer // Measurement Techniques. — 2017. — Vol. 60, N 1. — P. 75—81
5. Козлов С. Ф. Алмазные детекторы ядерных излучений // Алмаз в электронной технике. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 248 с. [Kozlov S. F. Diamond detectors of nuclear radiation // Diamond in electronic engineering. — Moscow: Energoatomizdat, 1990. — 248 p. (In Russian)]
6. Голодных Е. В. Обзор детекторов гамма-излучения для контроля положения ствола горизонтальной скважины // Вестник науки Сибири. — 2013. — № 1. — С. 129—138. [Golodnykh E. V. Overview of gamma-ray detectors for monitoring the position of the horizontal wellbore. // Bulletin of science of Siberia. — 2013. — № 1 (7). — P. 129—138. (In Russian)]
7. Wodniak K., Drozdowicz J., Dankowski B., et al. CVD diamond detectors for fast alpha particles escaping from the tokamak D-T plasma // Nukleonika. — 2011. — Vol. 56. — P. 143—147.
8. Conte G., Allegrini P., Pacilli M., et al. Three-dimensional graphite electrodes in CVD single crystal diamond detectors: charge collection dependence on impinging beta-particles geometry // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. — 2015. — A. 799. — P. 10—16.
9. Козырев А. С., Митрофанов И. Г., Бенкхофф Ж. и др. Перспективный сцинтилляционный детектор на основе бромид-церия для космического гамма-спектрометра МГНС // Приборы и техника эксперимента. — 2016. — № 4. — С. 92—100. [Kozyrev A. S., Mitrofanov I. G., Benkhoff J., et al. Perspective scintillation detector based on cerium bromide for the cosmic gamma spectrometer MGNS. // Devices and techniques of the experiment. — 2016. — № 4. — P. 92—100. (In Russian)]
10. Davydov L., Rybka A., Vierovkin A., et al. Registration of high-intensity electron and x-ray fields with polycrystalline CVD diamond detectors // Proceedings of the SPIE. — 2012. — Vol. 8507, id. 85071. — N 12.
11. Аглинцев К. К. Дозиметрия ионизирующих излучений. Изд. 2-е, перераб. — М.: Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1957. [Aglintsev K. K. Dosimetry of ionizing radiation Moscow: Gos. izd-vo tehniko-teoret. lit., 1957. (In Russian)]
12. Ельцин В. Ф., Ельцин Д. В., Ермак М. Г. и др. Спектрометрические комплексы “ГРИН СТАР” с многоканальными цифровыми анализаторами серии MCA // ООО НИПП “Грин Стар Инструментс”. URL: <http://www.greenstar.ru>. [Yeltsin V. F., Yeltsin D. V., Ermak M. G., et al. Spectrometric complexes “GREEN STAR” with multichannel digital analyzers of MCA series. // LLC NIPP “Green Star Tools”. URL: <http://www.greenstar.ru>. (In Russian)]
13. Трошчьев С. Ю. Эффективность регистрации гамма-квантов с энергией от 0,5 до 3,0 МэВ детектором из сверхчистого германия Canberra GC3019 // ВМУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. — 2013. — № 2. [Troshchiev S. Yu. The efficiency of detection of gamma quanta with energy from 0.5 to 3.0 MeV by the detector from the ultra-pure germanium Canberra GC3019 // VMU. Series 3. Physics. Astronomy. — 2013. — N 2. (In Russian)]
14. Афанасов И. Практикум “Основы радиохимии и радиоэкологии” // Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова. — М., 2008. [Afanasov I. Workshop “Fundamentals of radiochemistry and radioecology” // Chemistry Department of M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 2008. (In Russian)]
15. Металин Л. А., Чубаров С. И., Тимохин Л. А. и др. Электронные методы ядерной физики. — М.: Атомиздат, 1973. — 520 с. [Metalin L. A., Chubarov S. I., Timokhin L. A., et al. Electronic methods of nuclear physics. — Moscow: Atomizdat, 1973. — 520 p. (In Russian)]

Поступила в редакцию 25.06.2018
После доработки 28.01.2019
Принята к публикации 11.02.2019

Уважаемые читатели!

Если Вы не успели подписаться на журнал “Датчики и системы”, напоминаем Вам, что через Редакцию можно оформить льготную подписку в любое время и с любого номера (дешевле, чем через каталоги агентств) или приобрести номера журнала за прошедшие годы.

Можно также заказать электронные версии как необходимого Вам номера журнала, так и отдельных статей.

Позвоните в Редакцию по тел. (495) 330-42-66 или пришлите заказ по электронной почте (E-mail: datsys@mail.ru) — и подписка будет оформлена за один день. Расходы по пересылке журнала Редакция берет на себя. Не забудьте указать свой полный почтовый адрес!

Наш адрес: 117997, В-342, ГСП-7, Профсоюзная ул., д. 65, ИПУ РАН, оф. 383.

**ДАТЧИКИ
и СИСТЕМЫ**